IKONOS 高分解能衛星画像と現地踏査を併用したブルカノ式噴火噴出物の解析：浅間火山 2004 年 9 月 1 日噴火を例に

The analyses of the vulcanian eruption products based on combination of the IKONOS high-resolution satellite imagery and the field survey: An example of the eruption of the Asama volcano on September 1st in 2004

Abstract

阪上雅之^{*†} 佐々木 寿^{**}
三宅康幸^{***} 向山 栄^{**}

Masayuki Sakagami^{*†}, Hisashi Sasaki^{**},
Yasuyuki Miyake^{***} and
Sakae Mukoyama^{**}

2009 年 8 月 12 日受付.

2011 年 7 月 16 日受理.

^{*} 信州大学大学院工学系研究科地球生物圏科学専攻

Graduate school of Science and Technology,
Shinshu University, 3-1-1 Asahi, Matsumoto,
Nagano 390-8621, Japan

^{**} 国際航業株式会社

Kokusai Kogyo Co., Ltd., 2-24-1 Harumi-
cho, Fuchu, Tokyo 183-0057, Japan

^{***} 信州大学理学部地質科学科

Department of Geology, Faculty of Science,
Shinshu University, 3-1-1 Asahi, Matsumoto,
Nagano 390-8621, Japan

[†] 現所属：国際航業株式会社

Present address: Kokusai Kogyo Co., Ltd.,
2-24-1 Harumi-cho, Fuchu, Tokyo 183-0057,
Japan

Corresponding author: M. Sakagami,
masayuki_sakagami@kk-grp.jp

The Asama volcano erupted on 1 September 2004, followed by several more eruptions during the period from September to December 2004. In the proximal area, particularly on the western side of the crater, the distribution and details of ejecta from the September 1 eruption have not been well studied. The purpose of this study is to investigate the ejecta from this area, and to obtain information concerning the juvenile magma of one eruption. Sasaki and Mukoyama (2006) presented a distribution map of the impact craters of the September 1 eruption, using IKONOS high-resolution satellite imagery; this imagery is partially effective for determining the distribution of ejecta from the eruption. However, ejecta in deep forests are not detectable by IKONOS imagery, and the rock types of the ejecta cannot be ascertained from imagery alone. Therefore, we collected field observations on the distribution of ejecta, to evaluate the effectiveness of IKONOS imagery data. After examining 130 impact craters identified by Sasaki and Mukoyama (2006), we determined that more than 100 of the impact craters (of various sizes) had been formed by impacts of massive and/or altered accessory blocks. At the other 30 spots, we discovered three juvenile breadcrust bombs. Moreover, we discovered 24 bombs at sites not detected by the IKONOS imagery. These results indicate that a combination of satellite imagery and field surveys is required to obtain precise distributions and details of volcanic ejecta. The water contents in the glass rinds of the 22 breadcrust bombs were from 0.49 to 0.86 wt.%. Calculations of magma depth on the basis of these water contents indicate that the magma column was at least 180 m high.

Keywords: Asama volcano, volcanic eruption, volcanic bomb, high-resolution satellite imagery, IKONOS, reconstructions of volcanic eruptions

はじめに

ブルカノ式噴火の過程に関する従来の研究には、地球物理学的な観測データに基づく研究(e.g., Ishihara, 1985; 井口, 2000)が多いのに対して、地質学・岩石学的なアプローチは少ない。後者の代表的な研究事例としては、含水量測定に基づく火道浅部の過剰圧の推定やマグマからの脱ガス過程に関する研究(e.g., Harford et al., 2003; 竹内ほか, 2006; Wright et al., 2006; 牧野ほか, 2006)、噴出物の表面形態をもとに噴火直前の火道浅部構造を復元した研究(Yamagishi and Feebrey, 1994)がある。これらの研究例は、噴出物の特徴や火道浅部構造および爆発メカニズムについて議論している。だが、ブルカノ式噴火は間欠的に噴火を繰り返すた

め、1回のブルカノ式噴火による噴出物を現地にて特定し、噴火イベントごとの噴火過程を議論した研究は少ない。さらに、1回のブルカノ式噴火による火口近傍での本質物や類質物それぞれの分布や噴出量については、あまり知られていない。ブルカノ式噴火の地質学・岩石学的な研究事例が少ない原因として、次の理由が考えられる。①火口近傍には過去の複数の噴火イベントによる噴出物が分布していることが多く、対象となる噴火イベントの噴出物を特定することが容易ではない。②噴出物には類質物が多く、本質物が少ないケースが多い。これらの課題を克服するためには、噴火直後の迅速な現地踏査による噴出物の特定および採取が求められる。しかし、ブルカノ式噴火は間欠的に噴火を繰り返すため、噴火直後の調査で火口近傍に長時間滞在することは困難であ

Table 1. Sequence of the 2004 eruptions. The infrasonic wave data are from the Japan Meteorological Agency (<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>). Rock types of the ejecta were compiled from Shimano et al. (2005), Miyake et al. (2005), and the Shinshu University Research Group for Asama 04 Eruptions (<http://science.shinshu-u.ac.jp/~geol/Miyake/04asama.html>).

Date	Major event	Infrasonic wave (Pa)	Ejecta
Sep. 1	Vulcanian explosion	205	ash, lapiilli, pumice, volcanic bomb, block
Sep. 14-18	Continuous, small strombolian explosions	9*	ash, lapiilli, pumice, block
Sep. 23	Vulcanian explosion	72	ash, lapiilli, scoria, block
Sep. 29	Small vulcanian explosion	30	ash, lapiilli, scoria, block
Oct. 10	Small vulcanian explosion	19	ash, lapiilli, scoria
Nov. 14	Vulcanian explosion	73	ash, lapiilli, block
Dec. 9	Small vulcanian explosion	-	ash

* Maximum value

る。また、一般的に噴火活動が活発な場合、広範囲において火山近傍への立ち入りが規制されることもあり、噴火直後の現地踏査は難しい。

本研究では、近年発生したブルカノ式噴火の中から、浅間火山 2004 年 9 月 1 日噴火(以下、9/1 噴火と略す)を対象とした。噴火イベントに対応する噴出物(以下、弾道噴出物の意味で用いる)を現地踏査と高分解能衛星画像や室内分析の情報によって高分解能な噴出物特定を行った。また、1 回の噴火噴出物を確実に採取し、岩石学的な検討を加えることで、ブルカノ式噴火の噴火過程をより定量的に評価する試みを行った。

浅間火山 2004 年 9/1 噴火の研究と課題

1. 浅間火山 2004 年噴火の概要

2004 年に起きた噴火活動について、Table 1 に示す。噴火活動は 2004 年 9 月 1 日午後 8 時 02 分、21 年ぶりのブルカノ式噴火で開始した。観測された空振は 205 Pa と、2004 年一連の活動の中で最も大きい(Table 1)。噴火発生時、火口上空には南西方向からの風が吹いており、噴煙は上空の風によって北東方向へ流され、約 250 km 離れた福島県相馬市においても降灰が確認された(気象庁, 2004)。

9 月 1 日以降の一連の噴火活動について、概要を以下に記す。気象庁(2004)によると、9/1 噴火から 2 週間後に火山活動は再び活発化した。9/1 噴火より小規模な噴火を 9 月 14 日に 3 回、9 月 15 日に約 40 回繰り返した。その後、9 月 16 日から 17 日にかけて、ほぼ連続的に噴煙を上昇させ、9 月 17 日夕方から 18 日夜までに、約 50 回以上の小規模噴火を繰り返した。大木ほか(2005)によると、9 月 16 日に火口底に直径 140 m の溶岩ドームが確認され、9 月 16 日未明から溶岩噴出が断続的に続いていたと考えられている。また、9 月 17 日未明にかけて連続的に赤熱した噴出物が火口から飛散する様子が目撃されたことから、中田ほか(2005)、寺田ほか(2005)はその噴火をストロンボリ式噴火と呼んで

いる。その後、9 月 23 日、29 日、10 月 10 日、11 月 14 日、12 月 9 日にブルカノ式噴火を繰り返し、終息に至った(Table 1)。

2. 9/1 噴火の噴出物分布と認定

浅間火山 2004 年噴火直後は、火口近傍への立ち入りが規制されたため、噴出物の調査が火口より 4 km 以遠での地域を中心に行われた(e.g., 三宅ほか, 2005; 嶋野ほか, 2005; 吉本ほか, 2005) (Fig. 1)。その後、火口近傍でも、登山道沿いや火口周辺の限られた地域で現地踏査が行われ(吉本ほか, 2005; 気象庁, 2005)、噴出物の分布図が作成された(気象庁, 2005)。しかし、これらの噴出物を特定した明確な根拠は提示されておらず、その詳細は不明である。

現地踏査が困難な場合、火口近傍における噴出物の分布をリモートセンシングの手法によって把握しようとする試みがある。だが、火口上空に飛行規制が行われる場合があり、噴火直後に航空写真などの画像が必ずしも得られるわけではない。

近年、地上分解能 2.5 m 以下の高分解能衛星画像が地質災害はじめ多くの災害状況把握に利用されている(e.g., 小荒井ほか, 2008)。浅間火山 2004 年 9/1 噴火についても、衛星画像(以下、高分解能衛星画像の意味で使用する)を用いた状況把握が行われた。佐々木・向山(2006)は 2002 年 9 月 24 日と噴火 2 週間後の 2004 年 9 月 15 日に撮影された IKONOS 衛星画像の対比により、噴出物等の飛散物質によって形成された着弾痕(以下、インパクトクレーターの意味を含む)を認定している。Fig. 2 に 9/1 噴火前後の衛星画像、Fig. 3 に衛星画像を用いて判読された着弾痕の方位別分布密度図を示す。3 m 以上の着弾痕は、火口から 1 km 程度離れた地域に多く分布する。また、着弾痕は全体的に火口の東側より西側に集中していることがわかる。この方法は火口付近への立ち入りが危険な状況となる活火山で広域的な噴出物の分布を抽出する方法として、今後大変有効となる可能性がある。しかし、この IKONOS 衛星画像を用いて認定さ

Fig. 1. Map of the study area. Topography adapted from 1:25,000 quadrangle maps of Kurumazakatoge, Asamayama, and Kitakaruizawa (Geographical Survey Institute). K, Kama-yama central cone; M, Maekake-yama.

れた噴出物は、未だ現地で照合されていない。そこで本研究第一の目的は、現地踏査を行い、IKONOS 衛星画像によって認定された噴出物の分布を現地で確認し、さらに室内分析による検討を加えて 9/1 噴火の噴出物を特定することである。

3. 9/1 噴火の噴出物全体像の解明

9/1 噴火噴出物について、本質物と類質物を区別した岩石学的研究事例には以下のものがある。三宅ほか(2005)は、火口から約 4 km 以上東方の地点で採取した試料に基づき 9/1 噴火の噴出物とそのうちの本質物について、次のように報告した。① 9/1 噴火の噴出物は、本質物と類質物からなる。全噴出物に占める本質物の割合は 7.4 wt.% である。② 本質物は完全な形態を保持した場合はパン皮状軽石である。厚さ 1 cm 以下の非孔質な黒色安山岩の皮殻が周縁を取り囲

み、内部は白色の多孔質部からなる。多くの場合、着地時または飛来中に割れて断片状を呈し、内部の多孔質部分のみ存在することもある。③ 類質の安山岩は黒色緻密で多角形状である。④ 本質物であるパン皮状軽石の皮殻と内部の多孔質部分の全岩化学組成は酷似しており、いずれも $\text{SiO}_2 = 60.9 \sim 61.2$ wt.% の間によく集中している (Table 2)。それに対して類質の安山岩の化学組成は $\text{SiO}_2 = 57.0 \sim 60.3$ wt.% であり、本質物の組成範囲とは異なる。

以上のことから、三宅ほか(2005)は、類質物で示される既存の山体中に新たなマグマが注入され、マグマ由来のガスの圧力により発生したブルカノ式噴火によって既存山体の岩石と共にマグマの破片が噴出したと考えた。さらに、マグマの破片は、遅延発泡により飛行中に膨らんでパン皮状軽石を形成したと考えた。また、嶋野ほか(2005)も同様に、9/1

Fig. 2. IKONOS imagery of Asama volcano, located approximately 1.2 km northwest of the summit crater. (a) True color imagery, acquired prior to the 1 September 2004 eruption (September 24, 2002). (b) True color imagery of the same area as (a) after the eruption on September 1, 2004 (September 15, 2004). Yellow circles, impact craters; red circles, regions with high densities of impact craters.

Fig. 3. Azimuthal density distribution of impact craters based on the IKONOS imagery. This figure shows the number of impact craters in a radial region 0.7 km to 1.5 km from the center of the crater. The highest density of impact craters is in regions shaded red.

Table 2. Whole rock chemistry of the ejecta of 1783–2004 eruptions. The data for the 2004.9/1 pumice and the 2004.9/23 scoria are from Miyake et al. (2005). The major element contents were recalculated on the basis of a total of 100 wt.%.

Sample No. (AsVB)	2	11	14	16	17	18	19	34	9	28	35	37	38	41	42	24	36
Eruption date	1783-1982	1783-1982	1783-1982	1783-1982	1783-1982	1783-1982	1783-1982	1783-1982	Sep.1 2004	Sep.1 2004	Sep.1 2004	Sep.1 2004	Sep.1 2004	Sep.1 2004	Sep.1 2004	Sep.1 2004	Sep.1 2004
Rock type**	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
SiO ₂	60.92	60.29	61.14	60.64	60.31	60.15	60.12	60.40	61.11	61.18	61.15	61.10	61.02	60.93	60.92	61.23	61.24
TiO ₂	0.71	0.73	0.70	0.72	0.71	0.73	0.72	0.72	0.71	0.71	0.71	0.72	0.71	0.71	0.71	0.71	0.69
Al ₂ O ₃	15.88	16.13	16.14	15.86	16.10	16.06	16.21	16.25	15.96	15.83	15.91	15.83	15.84	16.01	16.03	15.90	16.04
Fe ₂ O ₃ ***	7.00	7.14	6.79	7.23	7.12	7.32	7.21	7.18	7.01	7.13	6.98	7.11	7.11	7.04	7.05	7.06	6.90
MnO	0.11	0.12	0.11	0.11	0.11	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
MgO	4.02	3.97	3.70	4.07	4.13	4.16	4.04	3.94	3.84	3.93	3.93	3.94	4.03	3.96	3.96	3.87	3.80
CaO	6.78	7.13	6.77	6.88	7.05	7.04	7.13	6.95	6.66	6.63	6.65	6.56	6.68	6.74	6.72	6.59	6.63
Na ₂ O	3.20	3.18	3.26	3.14	3.16	3.13	3.16	3.12	3.21	3.07	3.15	3.23	3.11	3.13	3.11	3.10	3.17
K ₂ O	1.26	1.18	1.28	1.22	1.18	1.17	1.17	1.20	1.28	1.28	1.29	1.28	1.29	1.27	1.27	1.31	1.30
P ₂ O ₅	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Sample No. (AsVB)	P-1*	P-2*	P-3*	P-4*	P-5*	P-6*	S-1*	S-2*	S-3*	S-4*
Eruption date	Sep.1 2004	Sep.1 2004	Sep.1 2004	Sep.1 2004	Sep.1 2004	Sep.1 2004	Sep.23 2004	Sep.23 2004	Sep.23 2004	Sep.23 2004
Rock type**	P	P	P	P	P	P	S	S	S	S
SiO ₂	60.90	60.92	61.02	61.19	61.21	61.43	60.68	60.78	61.10	60.93
TiO ₂	0.69	0.71	0.69	0.70	0.70	0.68	0.68	0.70	0.69	0.71
Al ₂ O ₃	16.23	15.90	16.14	15.80	15.86	16.13	16.33	15.86	15.83	16.10
Fe ₂ O ₃ ***	7.00	7.36	6.96	7.26	7.14	6.97	7.14	7.41	7.27	7.15
MnO	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.11	0.11
MgO	3.81	3.91	3.87	3.86	3.92	3.83	3.87	4.13	3.97	3.77
CaO	6.74	6.64	6.73	6.56	6.53	6.42	6.74	6.60	6.57	6.75
Na ₂ O	3.10	3.04	3.08	3.07	3.07	2.98	3.07	3.01	3.02	3.08
K ₂ O	1.28	1.28	1.29	1.33	1.33	1.33	1.25	1.27	1.32	1.29
P ₂ O ₅	0.12	0.12	0.11	0.12	0.12	0.12	0.11	0.11	0.12	0.12
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

* Data from Miyake et al., (2005)

** B: Bread crust bomb, P: Pumice, S: Scoria

*** Fe₂O₃ = Total Fe as Fe₂O₃

噴火の噴出物はパン皮状軽石と石質緻密火山岩塊からなるとし、前者が本質物、後者は過去の噴出物である可能性が高いと考えている。

しかし、これらの研究事例は、火口から4 km以上東方に降下した噴出物に依拠している。そこで本研究第二の目的は、未解明である火口西側地域の9/1噴火の本質物も含めて、噴火過程の全方位的復元に寄与する情報を得ることである。

9/1 噴火噴出物の特定

1. IKONOS 衛星画像情報の活用

本研究では、現地踏査と高分解能衛星画像の情報を活用することで、9/1噴火の噴出物を特定した。そして岩石学的な検討を加えて噴火過程に関する考察を行った。現地で噴出物を特定できない場合は、室内分析および公開されている浅間火山監視画像の解析を行い、目的の試料を確実に得ることを試みた。以下に、本研究で用いたIKONOS衛星画像の特徴と活用方法についてまとめる。

IKONOS衛星画像の地上分解能は1 m、水平誤差は±3.5 mである。IKONOS衛星画像から読み取れる着弾痕

は最小3 mであり、3 m以上の微小な地表の凹凸(着弾痕・植生変化)が抽出可能である(Fig. 2)。また、これらの微地形を形成する噴出物の噴出時期の推定や、現地では容易に把握できない広域的な噴出物分布の抽出に有効である(Fig. 3)。さらに、複数の波長帯を合成カラー表示することにより、植生変化(噴火による焼失地域等)の抽出が可能である。

一方、火口上空に噴気や噴煙がある時は、着弾痕の判読が困難である。また、3 m以下の地表の凹凸や噴出物は現地踏査によらないと発見できない。植生の多い地域や林の中でも同様である。さらに、噴火前後の状況を比較するためには、噴火前から衛星画像データの蓄積が必要である。

このように、IKONOS衛星画像から抽出できる情報には特徴がある。現地踏査と衛星画像判読を融合させることで、現地踏査単独では難しかった9/1噴火噴出物の発見や特定が可能になることが期待される。

2. 現地踏査の概要

現地踏査は、佐々木・向山(2006)が判読した着弾痕207地点のうち130地点を含む分布密度の高い釜山火口の北西–南側の領域(Fig. 4)を中心に、噴火から2年後の2006年5月より2007年11月の期間に行った。立ち入り禁止区域

Fig. 4. Distribution of ejecta from the September 1 eruption. Impact crater data were compiled from Sasaki and Mukoyama (2006).

(調査当時：釜山火口より 500 m 以内)および、鬼押出し溶岩流が分布する火口より北側地域は調査対象外とした (Fig. 4)。

現地踏査の準備としてカシミール 3D (杉本, 2002) の地図へ 9/1 噴火による着弾痕分布 (佐々木・向山, 2006) をプロットした。これらのデータを携帯型 GPS へ移しかえ、現地で着弾痕を探すための補助ツールとして用いた。また、2004 年 9 月 15 日に撮影された浅間火山周辺の IKONOS 衛星画像を印刷し、現地で確認するために使用した。IKONOS 衛星画像は分解能が高く登山道等が認識可能であるため、現地での位置特定に有効であった。なお、筆頭著者は 2004 年噴火以前に本研究地域を調査しており、その際に撮影した写真も調査の参考として使用した。

釜山火口から 2 km 以内には 2004 年以前の噴火による火山岩塊、パン皮状火山弾が多量に散在している。そこで、岩相の違いから、1783 年天明噴火堆積物より上部に堆積しているガラス光沢が新鮮な火山岩塊およびパン皮状火山弾を、ここ数十年に噴出したブルカノ式噴火による噴出物であると推定した。それらのうち単なる転石ではなく着弾痕を形成しているもの、噴出物直下の植生に焦げ跡があるものなどを、火口から近年飛来してきたと判断し、後述する作業ステップ

Step1

Are the ejecta or impact crater found by the IKONOS satellite imagery?

YES

NO

Step2

- (A) Scorched evidence.
- (B) Presence and quantity of vegetation in the impact crater.
- (C) Bulk rock chemistry are similar to Sep.1 pumice and Sep.23 scoria.

Step3

The analysis of the Asama volcano monitor image and existing research.

Sep.1, 2004 eruptive product

Fig. 5. Procedures to identify ejecta as belonging to the 1 September 2004 eruption.

Fig. 6. Result of an inspection by Sasaki and Mukoyama (2006).
*Identified as juvenile material from the 1 September 2004 eruption.

を基に 9/1 噴火の噴出物を特定した。なお、本研究では既往の岩石学的研究による成果(三宅ほか, 2005; 嶋野ほか, 2005)に基づき、9/1 噴火による本質物はパン皮状火山弾、類質物は緻密な火山岩塊であると判断して研究を進めた。

次に、佐々木・向山(2006)により抽出された 3 m 以上の着弾痕に対応する噴出物および、衛星画像判読では抽出できなかった 9/1 噴火噴出物について分けて記述する。噴出物特定に関する作業ステップを Fig. 5 に、現地踏査により明らかになった着弾痕内の噴出物について Fig. 6 に示す。

3. 現地踏査による 9/1 噴火噴出物の特定方法とそれらの産状

3.1 衛星画像判読の着弾痕に対応する噴出物

IKONOS 衛星画像で確認できた着弾痕内および植生の火災跡にあった火山岩塊やパン皮状火山弾は、全て 9/1 噴火の噴出物であると特定した(Fig. 5 の Step 1)。しかし、着弾痕を形成している類質物も存在した。そのため、両者を分けて記載した。

3.1.1 類質物 佐々木・向山(2006)による着弾痕 130 地点のうち 100 地点では、噴出物の大半が黒色で結晶質な緻密岩片や捕獲岩片を含む岩片、変質岩片などが形成した着弾痕であった(Fig. 6)。また、これらの着弾痕は、現地踏査単独では 9/1 噴火による着弾痕であることを確認できない場合が多く、IKONOS 衛星画像が有効であった(Fig. 7)。例えば、試料 AsVB64 が形成した着弾痕は、IKONOS 衛星画像では明瞭に識別できるが、火山岩塊や軽石が散在する前

掛山の急勾配の斜面に形成されたため、現地踏査のみでは周囲の地形との識別が難しかった(Figs. 7b, 7c)。

また、早川ほか(2006)によると、火口から北西へ 1.7 km 離れた標高 2,000 m 地点では火災が発生し、ガンコウラン・ミネズオウ群落が焼失した(Fig. 8a)。さらに、現地には直径 1 m の噴石が着弾痕内に残っていたと、報告している。該当地域を調査し、植生の火災跡では最大長径 1 m の無数の黒色緻密な岩塊や変質岩塊を確認した(Fig. 8c)。

佐々木・向山(2006)の着弾痕 130 地点のうち 27 地点では、現地にて 9/1 噴火による着弾痕であることが確認できなかった(Fig. 6)。その要因として、地形変化が微小である、植生がない、または着弾痕内に該当する噴出物が見当たらない等のために、9/1 噴火またはそれ以前の噴火によるものか、識別できなかったことが挙げられる。

3.1.2 本質物 前述の着弾痕 130 地点のうち 3 地点のみ、パン皮状火山弾が形成した着弾痕であることを確認した(Fig. 6)。これらの分布は次のとおりである。現地踏査で確認した 3 地点は、いずれも火口の西方向に局所的な分布をしており、釜山火口縁から約 1,200~1,400 m の範囲にあった。また、着地状況については以下のとおりである。3 m 以上の着弾痕を形成した本質物は着地時に著しく破砕され、着弾痕内には平均して 5~10 cm の破片が散在していた(Fig. 7d)。現地踏査により、本質物が形成した最大の着弾痕は直径約 5 m にもおよぶことが明らかになった(Fig. 7d)。着弾痕内の本質物の破片をもとに、破砕前の形を復元

Fig. 7. Two of the large impact craters from the 1 September 2004 eruption. (a) IKONOS imagery on the western side of the crater (data acquired: September 15, 2004). Impact craters (b) and (d) were readily identified in IKONOS imagery. The banded structure of bomb AsVB43 is visible in (d) and (e) the hammer is 35 cm long.

Fig. 8. Areas of forest fire caused by the 1 September 2004 eruption. (a) IKONOS imagery of an area approximately 1.2 km northwest of the crater (data acquired: September 15, 2004). White circles indicate areas of forest fires. (b) and (c) Field characteristics of an area of forest fire caused by hot ejecta.

Fig. 9. Field characteristics of breadcrust bombs from the 1 September 2004 eruption; hammer is 35 cm long. (a) Evidence of scorching. (b) and (c) No impact crater is present, but the characteristic glassy crust of the bombs is preserved.

すると長径 1 m 以上あった。着弾痕形成の要因は、源岩が大きかったためと考えられる。

3.2 衛星画像から判読不可能な 3 m 以下の着弾痕に対応する噴出物

IKONOS 衛星画像からは判読できない 3 m 以下の着弾痕を形成している噴出物 (Fig. 5 の Step 1 で No としたもの) について、以下の基準において本質物と類質物の区分を行った (Fig. 5 の Step 2)。

3.2.1 類質物 現地踏査では、3 m 以下の緻密な黒色岩塊および変質または赤色酸化した岩塊を多く確認できたが、これらは IKONOS 衛星画像からは判読できない。現地踏査のみでは 9/1 噴火による噴出物か否かの判断ができないため、本研究では対象外とした。

3.2.2 本質物の絞り込み 現地踏査により 3 m 以下の着弾痕を形成するパン皮状火山弾を数多く確認できた。それらの多くは植生が乏しい地域に着地したこと、また表面に新鮮なガラス光沢をもたないため、噴出時期については特定できなかった。しかし、いくつかの地点では新鮮なガラス光沢を持つパン皮状火山弾を発見した。これらのパン皮状火山弾については 9/1 噴火による本質物か否か、以下に記す基準に基づいて、本質物の候補を抽出した。

①**着地状況からの判断**：以下に挙げる 2 項目を現地で検討した。パン皮状火山弾直下の植生に焦げ跡があれば、2004 年噴出物の証拠と考えた (Fig. 5 の Step 2 (A))。また、着弾痕内に苔や草が見られず、さらに周囲の木々からの葉や枝の堆積が少なければ、2004 年噴出物の証拠と考えた (Fig. 5 の Step 2 (B))。

②**全岩化学組成からの判断**：現地にて過去の噴出物と識別が難しかった一部の試料について、全岩化学組成に基づいた既存研究による 9/1 噴火および 9/23 噴火の本質物と対比した (Fig. 5 の Step 2 (C))。分析結果は Table 2 と Fig. 10 に示す。主成分元素の分析は信州大学理学部蛍光 X 線分析装置 (PHILIPS 社製 PW2400) を用いて行った。分析条件、補正計算法および分析誤差については、三宅ほか (1996)、津金・三宅 (2001) に基づく。三宅・ほか (2005) によると、9/1 噴火の本質物であるパン皮状軽石の全岩化学組成は $\text{SiO}_2 = 60.9 \sim 61.2 \text{ wt.}\%$ 、9/23 噴火の本質物の組成は、 $\text{SiO}_2 = 60.7 \sim 61.1 \text{ wt.}\%$ と、両者よく似た組成範囲に集中している (Table 2, Fig. 10)。これらの化学組成と一致すれば、2004 年マグマ起源であると考えた。

このような、Fig. 5 に示した Step 2 (A) (B) (C) の検討の結果、38 個の試料が候補として選択された。さらにそれら試料に対し、Fig. 5 の Step 3 に相当する検討を行い、9/1 噴火によるものか検証した。

3.2.3 監視画像解析および既往研究に基づく本質物か否かの検証 現地および室内における検証により選別されたパン皮状火山弾は、9 月中旬の連続噴火または、その他の噴火噴出物である可能性がある。その可能性を、浅間火山監視画像 (国土交通省利根川水系砂防事務所 火山監視映像) の解析および既往研究結果をもとに検証した (Fig. 5 の Step 3)。以下、画像解析結果を基に 9/1 噴火の噴出物とそれ以外を

Fig. 10. SiO_2 -CaO diagram of bulk rock chemistry. The juvenile ejecta from the 1 September and 23 September 2004 eruptions can be distinguished from those of eruptions occurring between 1783 and 1982.

どのように区別したか記す。

③**9/16-17 噴火噴出物との区別**：9 月 16 日と 17 日の監視画像写真 255 枚を確認したところ、ほとんどの噴出物は北側斜面に飛散していた。北側以外に放出された唯一の噴出物は、9 月 17 日午前 4 時 28 分の東側カメラに写るものであり、釜山火口縁から南方向に約 1,050 m の地域に到達している。したがって、本研究で採取した釜山火口から北西-南方向 870~1,450 m 地点の噴出物は、9 月中旬に起きた小規模噴火による噴出物である可能性は低い。また、火口より南-東方向 1,500 m 以内で採取した試料は 9 月 17 日午前 4 時 28 分に放出した噴出物である可能性があるため、本研究では採用しないこととした。

④**9/23 噴火噴出物との区別**：監視画像では 9 月 22 日午前 0 時過ぎから 9 月 25 日午前 5 時まで悪天候の影響により、火口周辺の様子は不明である。三宅ほか (2005) によれば、9/23 噴火の本質物は黒色ガラスに富むスコリアであり、パン皮状火山弾は含まれない。このことから、本研究で採取したパン皮状火山弾は 9/23 噴火の噴出物ではないと判断した。

⑤**9/29 噴火噴出物との区別**：信州大学浅間火山 04 年噴火調査グループ (<http://science.shinshu-u.ac.jp/~geol/Miyake/04asama.html>) によると、9/1 噴火軽石の重量比は全噴出物量に対して 7.4 % である。一方、9/29 噴火における軽石は全体の 0.6 % と少ない。9/29 噴火に伴う空振は 30 Pa (Table 1) と小さく、また 9/29 噴火では本質マグマ由来の軽石の放出が少なかった。このことから、本研究で採取した

Table 3. H₂O contents in glass rinds, vesicularity of the breadcrust bombs, and other characteristics of the samples.

Sample No. (AsVB)	H ₂ O in glass rind (wt%)			Diameter (cm)	Fragment on impact	Rind thickness (mm)		Direction from the crater	Distance from the crater rim (m)	Density (g/cm ³)	Vesicularity (%) [*]
	Min	Max	Ave			Ave	Max				
9	0.43	0.63	0.50	40	○	10	20	W	1220	1.35	48.9
15	0.52	0.61	0.55	50<	○	9	12	NW	1362	1.43	46.1
28	0.47	0.57	0.52	35	-	11	17	W	1091	-	-
33	0.52	0.60	0.56	20	○	10	20	W	1021	-	-
35	0.52	0.66	0.58	40<	○	8	15	SW	1182	0.99	62.5
36	0.49	0.58	0.53	35<	○	6	-	SW	1114	1.32	50.1
37	0.46	0.58	0.52	40<	○	13	-	SW	2019	1.19	55.1
38	0.50	0.56	0.53	15<	○	6	8	NW	1406	-	-
41	0.57	0.66	0.60	40<	○	8	20	NW	1016	1.03	61.1
42	0.48	0.62	0.54	25	-	4	10	NW	1039	1.08	59.4
43	0.51	0.54	0.53	150<	○	10	10	NW	1392	1.82	31.3
54	0.49	0.57	0.53	30	-	13	25	NW	1367	-	-
63	0.51	0.60	0.55	14<	○	7	10	W	900	1.28	51.9
67	0.47	0.58	0.51	17	-	6	10	W	1205	-	-
72	0.46	0.56	0.49	21	-	9	16	W	1220	-	-
73	0.50	0.53	0.51	8	-	7	-	W	1220	-	-
75	0.53	0.66	0.57	16	-	8	13	W	1220	-	-
55	0.79	0.88	0.85	9	-	4	4	NE	2000 ^{**}	0.48	81.0
76	0.71	0.85	0.78	10	-	4	4	NE	2000 ^{**}	-	-
77	0.81	0.92	0.86	10<	○	4	4	NE	4000 ^{**}	-	-
78	0.65	0.75	0.70	10<	○	4	5	NE	2000 ^{**}	1.07	59.9
79	0.62	0.70	0.66	11	-	8	12	NE	2000 ^{**}	-	-

^{*} Density of the solid is from Miyake et al., (2005)

^{**} Exact distance is unclear

パン皮状火山弾は9/29噴火による可能性は低いと考えた。

④ 11/14 噴火噴出物との区別：11/14 噴火直後の東側地域における調査(信州大学浅間火山04年噴火調査グループ：<http://science.shinshu-u.ac.jp/~geol/Miyake/04asama.html>)によると、採取された噴出物には軽石は含まれていなかった。一方、嶋野ほか(2005)は11/14 噴火噴出物には火山礫サイズの軽石が含まれていると報告しているが、これに関する記載は吉本ほか(2005)にはない。11/14 噴火噴出物中の本質物が占める割合は、極めて少ないと考えられる。

3.3 3 m 以上の着弾痕を形成しない本質物の着地状況および分布

以上の検証の結果、新鮮なガラス光沢を持つパン皮状火山弾24個を、9/1 噴火による本質物と特定した。以下、これら24個の本質物の着地状況や分布について述べる。

3.3.1 着地状況 植生がある地域に落下した場合、平均長径が約15 cm 以上のものは3 m 以下の明瞭な着弾痕を形成する傾向にあった(Table 3)。平均長径が約15 cm 以下のものは、焦げ跡を形成するのみであった(Fig. 9a)。この場合、植生がクッションの様な役割を果たし、着地時の衝撃を緩和したことが考えられる。植生が無い地域に落下した場合、パン皮状火山弾は着地時に粉々に破碎されるケース(Fig. 9b)と、破碎されないケースがある(Table 3, Fig. 9c)。パン皮状火山弾は多孔質で脆く、開口割れ目が発達しているため、着地の衝撃で粉々に破碎することが多いと考えられる。

一方、破碎されないケースは(試料 AsVB42)、パン皮状火山弾自体が比較的軽い(見かけ密度 1.08 g/cm³)、着地時の衝撃をあまり受けなかった可能性が考えられる。

3.3.2 本質物分布 3 m 以下の着弾痕を形成する本質物は、調査地域内では火口から西-南西方向に局所的に分布する傾向にあった(Fig. 4)。佐々木・向山(2006)によると、噴出物の飛距離は北西-南地域では最も遠方で火口から1.7 km である。本研究での現地踏査により、新たに火口から2.0 km の範囲まで本質物が分布していることがわかった(Fig. 4, Table 3)。

3.3.3 本質物サイズ 着地の衝撃を受ける前の想定を含んだ本質物サイズは、長径8~150 cm を超えるものまで広い幅を持つが、直径8~40 cm 程度のものが最も多かった(Table 3)。火口から北西-南方向における本質物サイズと火口からの飛散距離との関係を、Fig. 11 に示す。調査地域内では、傾向として長径約40 cm 以下の本質物は、火口から870~1,400 m 付近に多く分布することがわかった(Fig. 11)。

一方、北東地域で本研究により採取された本質物は平均長径が約10 cm 程度である(Table 3)。西側で採取された本質物と比較すると長径は小さい。吉本ほか(2005)は火口から東南東約2 km の地点で長径30 cm のパン皮状火山弾を発見している。国土交通省利根川水系砂防事務所による噴火後(9月9日)の調査(<http://www.ktr.mlit.go.jp/tonesui/bou>)

Fig. 11. Relationship between the diameters of breadcrumb bombs from the 1 September 2004 eruption and their distance (generally westerly) from the crater.

sai/asama/index4.htm)では、火口より北東約 2.2 km および約 3.9 km 地点において、長径約 15 cm のパン皮状火山弾が発見されている。未公表ではあるが、筆頭著者も同地域を踏査し既往報告と同サイズのパン皮状火山弾を数多く確認している。だが、東側山麓には植生が少なく、さらに 9/1 噴火後の噴出物が東側へ多く飛来していることから、9/1 噴火による本質物であることを明確にはできなかった。本質物サイズおよび噴出距離ともに火口の西側と東側で大きな差はみられないと考える。

4. 9/1 噴火の噴出物分布のまとめと総体積

4.1 9/1 噴火の噴出物分布

着弾痕のような微地形は、現地においては確認しにくいため、噴火直後のわずかな地形変化を読み取れる IKONOS 衛星画像判読が大変有効であった。現地では、IKONOS 衛星画像で判読できない 3 m 以下の着弾痕を形成する噴出物を数多く確認できた。だが、類質物については、それらの噴出時期を特定することは困難であった。前述のような検討を加えて本質物の抽出を行った結果、9/1 噴火の噴出物分布の特徴が以下のように得られた。

佐々木・向山(2006)の示した着弾痕 130 地点のうち、3 地点で 9/1 噴火の本質物であるパン皮状火山弾を確認した (Fig. 6)。3 地点はいずれも、釜山火口の西側方向に局所的な分布をしており、火口縁から約 1,200~1,400 m の範囲にあった。それら以外の佐々木・向山(2006)が示した 130 地点の着弾痕のうち 100 地点を含む領域では、噴出物の大半が黒色で結晶質な緻密岩片や捕獲岩片を含む岩片、変質岩片などの類質物が形成した着弾痕であった (Fig. 6)。

佐々木・向山(2006)が着弾痕を判読できなかった地点で、24 個のパン皮状火山弾を発見した (Fig. 6)。これらのパン皮状火山弾は 9/1 噴火で噴出した本質物と判断された。火口から北西-南方向の調査地域内では、長径 8~40 cm 程度のものが主であり、火口から約 870~1,400 m 付近に局所的に分布していた (Fig. 11)。

上記の結果から、IKONOS 衛星画像で判読された噴出物

の約 8 割は、現地踏査により類質物であったことが明らかとなった (Fig. 6)。また、IKONOS 衛星画像では判読できなかった 9/1 噴火の本質物を現地で多数確認した。それらは、火口の西-南西方向に局所的に分布することが明らかとなった (Fig. 4)。

4.2 9/1 噴火噴出物の総体積

吉本ほか(2005)が算出した噴出量は、遠方で調査された火山灰量に関する見積りが主である。火口近傍における火山岩塊や火山弾等の噴出物はあまり考慮されていない。そこで、本研究により求めた火口近傍に飛散した 9/1 噴火の噴出物の体積を見積もった。現地踏査により得られた類質物および本質物の平均長径から平均体積を算出し、現地で確認した噴出物の個数をもとに総体積を見積もったところ、約 $0.08 \times 10^4 \text{ m}^3$ であった。吉本ほか(2005)による 9/1 噴火の噴出物量は約 $2 \times 10^4 \text{ m}^3$ であり、これに大きな影響を与えるものではなかった。

9/1 噴火本質物の含水量と発泡度

1. 目的

9/1 噴火による本質物と特定したパン皮状火山弾を用いて、含水量および見かけ密度の測定を行い、それに基づき噴火過程の復元を試みた。

Self et al.(1979)によれば、ブルカノ式噴火の噴火前のマグマにかかる圧力(全封圧)は、帽岩の岩石荷重と帽岩の引張強度の和である。これらのパラメータのうち、マグマにかかった圧力は含水量から推定できる。そこで、採取したパン皮状火山弾の皮殻部分の含水量を測定した。また、採取したパン皮状火山弾の発泡度の違いと飛散分布との関係を考察する目的で、見かけ密度の測定を行った。

2. 採取試料の概要

本研究で採取された試料は、西側地域(北西-南方向)のパン皮状火山弾 27 試料と、9/1 噴火直後に北東地域で採取されたパン皮状火山弾 5 試料を合わせた計 32 試料である。

試料の形状は、規則的な開口割れ目が発達した典型的なパン皮状火山弾が最も多い。その他には開口割れ目があまり発達していない、扁平に変形したパン皮状火山弾など特徴的な形状がいくつか含まれる。いずれの試料も表面の緻密でガラス質な皮殻部と、その内側の発泡した多孔質部に分けられる。パン皮状火山弾の皮殻の厚さは多様であり、平均 10 mm、最大約 30 mm 程度であることが最も多く、次に平均 3~5 mm と薄いこともある。また、9/1 噴火の本質物中には黒色緻密部と発泡部が縞状に引き伸ばされた縞状の火山弾も見られた (Fig. 7e)。また、鏡下観察の結果、石基結晶度には比較的高いものと低いものがある。大半のパン皮状火山弾の石基結晶度は高いが、北東地域に分布する一部のパン皮状火山弾には結晶度の低いものがみられた。

3. 含水量

3.1 測定試料および測定方法

含水量は、採取したパン皮状火山弾 32 試料のうち代表的な 22 試料について測定した。浅間火山における噴出物には多量の石基鉱物と火山ガラスの不均質な組織が存在し、火山

ガラス部分のみを分離して測定することは難しい。また、微小領域が測定可能な顕微赤外分光光度計を用いた場合も、測定領域内に多数のマイクロライトや微小な結晶片が存在するため、純粋な火山ガラス部分の含水量を測定することは不可能である。そこで本研究では、牧野ほか(2006)と同様に赤外線分光法を用いて、9/1 噴火の本質物中に見られる火山ガラスの含水量を定量した。牧野ほか(2006)は、9/1 噴火のパン皮状火山弾の皮殻部分の端部から発泡部へ連続的に測定し、ほぼ均質な含水量を示すことを報告している。このことから、本研究では特に皮殻部分の位置を限定せず測定した。測定には、信州大学理学部・顕微フーリエ変換赤外分光光度計(日本分光 Janssen MFT-2000 spectrometer)を用いた。赤外線分光法の測定条件は、牧野ほか(2006)に従った。全ての試料において石英のピークが見られたため、牧野ほか(2006)による石英のピークを取り除くプログラム(LIR-Crv10Q)を使用し、再計算を行った。

3.2 測定結果

測定結果は Table 3 に示す。分析した 22 試料の含水量は、0.49~0.86 wt.% の範囲にあり、平均含水量は 0.59 wt.% であった(Table 3)。これは、牧野ほか(2006)で求められた 9/1 噴火のパン皮状火山弾(北東地域で採取)皮殻部分の含水量 0.66 wt.% と大差ない。次に、試料採取地域ごとの測定結果を示す。

3.2.1 北東地域 北東地域 5 試料の測定結果は、0.66~0.86 wt.% と比較的高い含水量を示した(Table 3)。津金(私信)によると、同じく北東地域で採取された含水量の最小値は 0.54 wt.% であった。測定条件が同じであることから、この値を含めると、北東地域の含水量は 0.54~0.86 wt.% であると考えられる(Fig. 12a)。

3.2.2 北西-南地域 北西-南地域 17 試料の測定結果は、0.49~0.60 wt.% と範囲が狭く、北東地域よりも低い含水量を示した(Fig. 12a)。

4. 発泡度

4.1 測定試料および測定方法

採取したパン皮状火山弾 32 試料から、代表的な 11 試料の多孔質部について、ガラスビーズを用いた密度測定法(佐々木・勝井, 1981)で密度を測定した。各試料(平均約 5 cm³)をオープン(120 °C)で一晩乾燥させ、その重量を計測した。次に、0.5 mm より大きなガラスビーズを使用し、メスシリンダーを用いて体積を計測した。計測された重量と体積から、パン皮状火山弾の多孔質部について見かけ密度を算出し、発泡度を求めた。

4.2 測定結果

測定結果は、Table 3 に示す。北西-南方向地域で採取した 9 試料の発泡度は、31.3~62.5 % の範囲にあった(Table 3, Fig. 12b)。全体的にどの試料も発泡度が悪く、皮殻が厚い特徴を反映していると考えられる(Table 3)。一方、北東地域の 2 試料は発泡度が 59.9~81.0 % と比較的高い値を示し、両者には差がみられた(Table 3, Fig. 12b)。

三宅ほか(2005)は、火口より 4 km 先(北東方向)で採取されたパン皮状軽石の見かけ密度は、0.8~2.7 g/cm³ と変

Fig. 12. (a) Frequency histogram of water content in the glass matrix in the rind of sampled breadcrust bombs from the 1 September 2004 eruption. (b) Relationships between vesicularity of pumiceous interiors and water contents in the glass rind of the breadcrust bombs.

化に富むことを報告している。その要因は、皮殻部と多孔質部の量比の違いにあると、述べている。三宅ほか(2005)は軽石部分と皮殻部分を合わせて測定しているため、本研究の軽石部分のみの計測値とは直ちに比較できないが、三宅ほか(2005)の軽石に富む部分の計測値とは矛盾しない。

考 察

1. 本質物の分布域

本研究により識別できた西側地域の本質物の分布域は、佐々木・向山(2006)で判読された 3 m 以上の着弾痕とは異なる分布域を持つ傾向にある。佐々木・向山(2006)により抽出された着弾痕は、広域的に分布していた(Fig. 4)。これらの着弾痕のうち約 8 割は、火口底または火道浅部を塞いでいたと考えられる類質物(黒色緻密な岩塊、変質または赤色酸化した岩塊)である(Fig. 6)。これに対し、西側地域の本質物(パン皮状火山弾)は局所的に分布する傾向にある。噴出物の分布域の違いは、火口から飛び出す際の火道内の状態や火道内深度、放出角度、放出速度等の諸条件の違いを反映していると考えられる。

また、既往調査報告や本調査結果から、火口の東西方向による本質物サイズの違いは認められない。さらに、本研究による北西-南地域の本質物の発泡度は 31.3~62.5 % の範囲にあり(Fig. 12b)、北東地域の本質物の発泡度は 59.9~81.0 % と比較的高い(Fig. 12b)。西側地域には、多孔質部

Table 4. Estimation of the magmatic pressure just prior to the 1 September 2004 eruption.

Sample No. (AsVB)	Direction from the crater	Distance from the crater rim (m)	Vesicularity (%)	H ₂ O in glass rind (wt%)	P ₁ [*] (×10 ⁵ Pa)	T ^{**} (×10 ⁵ Pa)	P ₂ ^{***} (×10 ⁵ Pa)	Depth (m)
72	W	1220	-	0.49	24.0	20	4.0	16
42	NW	1039	59.4	0.54	28.0	20	8.0	33
41	NW	1016	61.1	0.60	34.5	20	14.5	59
77	NE	4000 ^{****}	-	0.86	67.3	20	47.3	193

* Pressure to confine water in the melt (After Zhang et al., 2007)

** Tensile strength

*** Lithostatic pressure (P₁-T)

**** Exact distance is unclear

の発泡度が高いものは見られない。勝井ほか(1975)は北海道駒ヶ岳において軽石密度の違いにより、噴出物の分布に降下中の分別作用が起きていることを指摘している。以上のことから、発泡度の違いが本質物の分布域の違いに関連している可能性がある。発泡度が低い本質物は風の影響を受けることなく風上の地域にも広く飛散し、一方北東方向の本質物は、風の影響を受けて飛散したことが考えられる。

2. 含水量に基づく 9/1 噴火マグマ柱の長さ推定

9/1 噴火のパン皮状火山弾の皮殻部分には発泡した痕跡がないため、その石基ガラスに含まれる水の量は爆発時点でマグマが含んでいた水の量を表すことになる(三宅ほか, 2005)。この量は脱ガスしつつあったマグマの噴火直前の温度・圧力条件でのマグマに溶け込む水の飽和含水量に等しい(津金ほか, 2006)。噴火直前のマグマ温度を 850 °C と仮定することで、マグマにかかった圧力を含水量から推定した(牧野ほか, 2006)。ただし、帽岩の引張応力を推定することは困難であるため仮定せざるをえない。測定したパン皮状火山弾のそれぞれにかかっていた帽岩引張応力が等しいと考えれば、含水量の差から各火山弾を形成したマグマ柱内での由来深度の差を求めることができる。本研究で測定した最小および最大含水量から、マグマ深度を算出した。マグマ深度の算出結果を Table 4 に示す。例えば、本研究で測定された最小含水量 0.49 wt.% から Zhang et al. (2007) による飽和含水量-圧力曲線を用いて圧力を推定したところ、その最小推定値は 24×10^5 Pa である (Table 4)。岩石の引張強度は、浅間火山と同じ安山岩質の Soufriere Hills 火山においては 40×10^5 Pa 以下 (Voight et al., 1999) であったとされている。本研究では便宜上引張強度を 20×10^5 Pa と仮定してマグマ深度を算出した。なお、引張強度の仮定は深度の見積りには影響するものの、マグマ柱の長さの見積りには影響しない。9/1 噴火の本質物は緻密な安山岩や発泡していない殻をもつパン皮状火山弾であることから、静岩圧推定のための密度は、 2.5 g/cm^3 とした。マグマ深度を算出した結果、最小含水量 (0.49 wt.%) で深度 16 m、最大含水量 (0.86 wt.%) で深度 193 m と求めた (Table 4)。この最小・最大深度の差から、9/1 噴火マグマ柱の長さは少なくとも 180 m 程度であったと考えられる。

本研究による北西-南地域で採取した本質物の含水量は比

較的低い。これは、火道浅部付近からもたされたことを示唆している。一方、北東地域で採取した本質物の含水量はより高いことから、火道のより深部からもたらされたと考えられる。含水量の特徴より、北西-南地域の本質物は深度約 10 ~ 60 m の 9/1 噴火マグマ柱浅部の位置から、北東地域の本質物は深度約 30 ~ 200 m の 9/1 噴火マグマ深部から噴出したと考えられる (Fig. 13)。

3. 9/1 噴火マグマ柱の直径

本研究により火口近傍に飛散した 9/1 噴火噴出物の総体積は約 $0.08 \times 10^4 \text{ m}^3$ と求めた。また、吉本ほか (2005) の噴出物量 (約 $2 \times 10^4 \text{ m}^3$) と、その中に占める本質物の割合 7.4 % (三宅ほか, 2005) に基づき、噴火をもたらしした 9/1 噴火マグマ柱の直径を見積もった。9/1 噴火マグマ柱を円柱と仮定した場合、本研究により求めたマグマ柱の長さ (177 m) を用いて算出したところ、9/1 噴火マグマ柱の直径は 3 m と細かったことが考えられる。なお、9/1 噴火時に上昇してきた火道内マグマが全て噴出したとは考えにくいいため、実際の火道の直径は約 3 m 以上あったと推定される。

ま と め

本研究では現地踏査に、高分解能衛星画像の判読結果、室内分析および火山監視画像分析を組み合わせることで、ブルカノ式噴火の噴出物調査を高分解能化することができた。9/1 噴火の噴出物のうち、比較的未解明であった火口西側地域を中心に現地踏査を行い、9/1 噴火の噴出物を特定することができた。また、1 回の噴火本質物 (パン皮状火山弾) を特定できたことで、より詳細な分布の把握や岩石学的検討が可能となり、次のことが明らかになった。

1. 現地踏査を行った結果、地層を形成しにくいブルカノ式噴火噴出物の分布を現地で把握するためには、衛星画像の活用が大変有効である。現地踏査単独では、ブルカノ式噴火噴出物の把握は難しい。平常時より、衛星画像や空中写真を整備し、噴火前後の現地状況を比較できる準備が必要である。
2. 本質物の分布は、火口の東西方向で差が見られ、これは発泡度の違いと噴火時の風に影響された。
3. 9/1 噴火には、含水量の異なる 2 種類のマグマが関与した。関与した 2 種類のマグマの火道内での垂直スケール

Fig. 13. Schematic diagram of the temporal changes occurring in the conduit during the 1 September 2004 eruption. (a) The September 1 magma is divided into two groups on the basis of variations in the water content of the breadcrust bombs: W_L 9/1magma, low water content September 1 magma; W_H 9/1magma, high water content September 1 magma. (b) Altered blocks, massive blocks, and breadcrust bombs were ejected from the orifice. Breadcrust bombs were ejected in all directions, but only highly vesicular bombs could be blown to the east by winds; V_H , high vesicularity; V_L , low vesicularity.

を推定できた。含水量測定により、北西–南地域の本質物はマグマ浅部の位置からもたらされた。北東地域の本質物の一部は、上記よりも深部から噴出したと考えられた。これらの推定に基づき深度を求めたところ、マグマ柱は鉛直方向に縦に少なくとも 180 m 程度の長さを持っていたと考えられた。

- 算出したマグマ柱の長さをを用いて、マグマ柱の直径を推定した。9/1 噴火マグマ柱の直径は約 3 m と細かったことが考えられる。なお、9/1 噴火時に上昇してきた火道内マグマが全て噴出したとは考えにくいいため、実際の火道の直径は約 3 m 以上あったと推定される。

高分解能な噴出物特定と噴出物の岩石学的検討を組み合わせることで、ブルカノ式噴火の噴火過程をより定量的に評価することが可能となった。現在ブルカノ式噴火に関する研究やモデルは、物理的な観測データに基づくものが多い。今後、本手法を用いた研究事例が増えることで、物質科学的な手法からも、ブルカノ式噴火過程の更なる理解につながると考える。

謝 辞

小論は、筆頭著者の修士論文の一部を含んでいる。信州大学の牧野州明氏・津金達郎氏・柏原秀雄氏の方々には、研究遂行にあたり、様々なご指導、ご鞭撻、ご協力をいただいた。馬場章氏・柳澤宏成氏(信州大学)・宮田(森岡)美名氏には現地踏査にご協力いただいた。現地踏査に際して、小諸市に小諸市営火山館の利用を許可いただいた。神田恵介氏(火山館館長)には、現地踏査時に便宜を図っていただいた。上信越高原国立公園特別保護地区に含まれる本調査地の試料採取にあたっては、環境省・中部地方環境事務所に許可をいただいた。9/1 噴火噴出物の検証にあたっては、国土交通省・

利根川水系砂防事務所のライブカメラ画像(<http://www.ktr.mlit.go.jp/tonesui/>)を使用させていただいた。東京大学地震研究所の武尾実氏・大湊隆雄氏には、浅間火山における最新の地球物理学的観測についてご教授いただき、そこでの議論は有意義だった。藤原伸也氏(国際航業株式会社)には、原稿の誤りや不備を指摘していただいた。査読者の早川由紀夫氏(群馬大学)、竹内晋吾氏(電力中央研究所)、編集委員の及川輝樹氏(産業技術総合研究所)には非常に有益なご意見をいただき、本論は改善された。ここに記して感謝の意を表したい。

文 献

- Harford, C. L., Spark, R. S. J. and Fallick, A. E., 2003, Degassing at the Soufriere Hills Volcano, Montserrat, recorded in matrix glass compositions. *Jour. Petrol.*, **44**, 1503–1523.
- 早川由紀夫・前嶋美紀・宮永忠幸・長井隆行・湯浅(佐藤)成夫・新井雅之(Hayakawa, Y., Maejima, Y., Miyayama, T., Nagai, T., Yuasa(Sato), S. and Arai, M.), 2006, 浅間山 2004 年噴火: 噴出物調査とインターネット掲示板によるリスク・コミュニケーション. *地学雑誌(Jour. Geogr.)*, **115**, 149–171.
- 井口正人(Iguchi, M.), 2000, 火山性地震の発生と火山爆発発生場としての火道内の状態変化. *月刊地球(Chikyu Monthly)*, **22**, 315–323.
- Ishihara, K., 1985, Dynamical Analysis of Volcanic Explosion. *Jour. Geody.*, **3**, 327–349.
- 勝井義雄・横山 泉・藤田隆男・江原幸雄(Katsui, Y., Yokoyama, I., Fujita, T. and Ehara, Y.), 1975, 駒ヶ岳. 北海道防災会議(Committee for Prevention of the Natural Disaster of Hokkaido, Sapporo), 194p.
- 気象庁(Japan Meteorological Agency), 2004, 浅間山 火山活動解説資料(平成 16 年年報) (*Volcano Activity Report*)*, 31p.
- 気象庁(Japan Meteorological Agency), 2005, 浅間山 火山活動解説資料(平成 17 年年報) (*Volcano Activity Report*)*, 20p.
- 小荒井衛・佐藤 浩・宇根 寛・天野一男(Koarai, M., Sato, H., Une, H. and Amano, K.), 2008, 各種光学高分解能衛星画像による地質災害の判読: 判読特性の視点から見た各種画像の比較検証. *地質雑誌(Jour. Geol. Soc. Japan)*, **114**, 632–647.

- 牧野州明・津金達郎・曾根原崇文・三宅康幸(Makino, K., Tsugane, T., Sonehara, T. and Miyake, Y.), 2006, 浅間火山 2004 年 9 月の噴出物の石基ガラスの含水量測定. 火山(*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **51**, 151–159.
- 三宅康幸・津金達郎・金井哲男・池元壮彦(Miyake, Y., Tsugane, T., Kanai, T. and Ikemoto, M.), 1996, 珪酸塩岩石試料の主成分の蛍光 X 線分析: 低希釈率ガラスビードの作成と迅速分析の精度. 信州大学理学部紀要(*Jour. Fac. Sci. Shinshu Univ.*), **31**, 105–117.
- 三宅康幸・高橋 康・津金達郎・牧野州明・角前壽一・西来邦章・福井喬士・信州大学浅間火山 04 年噴火調査グループ(Miyake, Y., Takahashi, K., Tsugane, T., Makino, K., Kakuzen, H., Nishiki, K., Fukui, T. and Shinshu University Research Group for Asama 04 Eruptions), 2005, 浅間火山 2004 年 9 月噴火の本質噴出物について. 火山(*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **50**, 333–346.
- 中田節也・吉本充宏・小山悦郎・辻 浩・ト部 卓(Nakada, S., Yoshimoto, M., Koyama, E., Tsuji, H. and Urabe, T.), 2005, 浅間山 2004 年噴火と過去の噴火との比較による活動評価. 火山(*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **50**, 303–313.
- 大木章一・村上 亮・渡辺信之・浦辺ぼくろう・宮脇正典(Oki, S., Murakami, R., Watanabe, N., Urabe, B. and Miyawaki, M.), 2005, 航空機搭載型合成開口レーダー(SAR)観測による浅間火山 2004 年噴火に伴う火口内の地形変化. 火山(*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **50**, 401–410.
- 佐々木寿・向山 栄(Sasaki, H. and Mukoyama, S.), 2006, 高分解能衛星画像を用いた浅間山 2004 年 9 月 1 日噴火の噴石着弾痕分布図. 火山(*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **51**, 63–73.
- 佐々木龍男・勝井義雄(Sasaki, T. and Katsui, Y.), 1981, ガラスビーズを使った軽石の密度測定法. 火山(*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **26**, 117–118.
- Self, S., Wilson, L. and Nairn, I. A., 1979, Vulcanian eruption mechanisms. *Nature*, **277**, 440–443.
- 嶋野岳人・飯田晃子・吉本充宏・安田 敦・中田節也(Shimano, T., Iida, A., Yoshimoto, M., Yasuda, A. and Nakada, S.), 2005, 浅間火山 2004 年噴火噴出物の岩石学的検討. 火山(*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **50**, 315–332.
- 杉本智彦(Sugimoto, T.), 2002, カシミール 3D 入門編(*KASHMIR 3D Beginning Guide*), 実業之日本社(Jitsugyo no Nihon Sha), 147p.
- 竹内晋吾・奥村 聡・山野井勇太(Takeuchi, S., Okumura, S. and Yamanoi, Y.), 2006, ブルカノ式噴火の発生要因としての火道浅部マグマの増圧過程. 岩石鉱物科学(*Japan. Mag. Mineral. Petrol. Sci.*), **35**, 144–152.
- 寺田暁彦・井田喜明・飯島 聖・吉本充宏・嶋野岳人(Terada, A., Iida, Y., Iijima, S., Yoshimoto, M. and Shimano, T.), 2005, (要 旨)
- 浅間火山で頻発した小規模噴火の噴煙運動の特徴: 2004 年 9 月 15–18 日噴火. 火山(*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **50**, 555–565.
- 東京大学地震研究所(Earthquake Research Institute, University of Tokyo.), 2007, 浅間山噴火時の震源メカニズム. 火山噴火予知連絡会会報(*Report of Coordinating Committee for Prediction of Volcanic Eruption*), **99**, 26–30.
- 津金達郎・三宅康幸(Tsugane, T. and Miyake, Y.), 2001, 珪酸塩岩石試料の微量成分のガラスビード法による蛍光 X 線分析. 平成 11~12 年度科学研究費補助金 基盤研究(C) (2) 研究成果報告書(*Grants-in-Aid for Scientific Research(C)*), 課題番号 11640447, 23–25.
- 津金達郎・牧野州明・三宅康幸・高橋 康(Tsugane, T., Makino, K., Miyake, Y. and Takahashi, K.), 2006, 浅間火山 2004 年噴火噴出物の鉱物粒径分布とマグマの結晶化過程. 火山(*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **51**, 49–61.
- Voight, B., Sparks, R. S. J., Miller, A. D., Stewart, R. C., Hoblitt, R. P., Clarke, A., Ewart, J., Aspinall, W. P., Baptie, B., Calder, E. S., Cole, P., Druitt, T. H., Hartford, C., Herd, R. A., Jackson, P., Lejeune, A. M., Lockhart, A. B., Loughlin, S. C., Luckett, R., Lynch, L., Norton, G. E., Robertson, R., Watson, I. M., Watts, R. and Young, S. R., 1999, Magma flow instability and cyclic activity at Soufriere Hills Volcano. *Science*, **283**, 1138–1142.
- Wright, H. M. N., Cashman, K. V., Rosi, M. and Cioni, R., 2006, Breadcrust bombs as indicators of Vulcanian eruption dynamics at Guagua Pichincha volcano, Ecuador. *Bull. Volcanol.*, **69**, 281–300.
- Yamagishi, H. and Feebrey, C., 1994, Ballistic ejecta from the 1988–1989 andesitic vulcanian eruptions of Tokachidake Volcano, Japan: Morphologies and genesis. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **59**, 269–278.
- 吉本充宏・嶋野岳人・中田節也・小山悦郎・辻 浩・飯田晃子・黒川 将・岡山悠子・野中美雪・金子隆之・星住英夫・石塚吉浩・古川竜太・野上健治・鬼沢真也・新堀賢志・杉本 健・長井雅史(Yoshimoto, M., Shimano, T., Nakada, S., Koyama, E., Tsuji, H., Iida, A., Kurokawa, M., Okayama, Y., Nonaka, M., Kaneko, T., Hoshizumi, H., Ishizuka, Y., Furukawa, R., Nogami, K., Onizawa, S., Niihori, K., Sugimoto, T. and Nagai, M.), 2005, 浅間山 2004 年噴火の噴出物の特徴と降灰量の見積もり. 火山(*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **50**, 519–533.
- Zhang, Y., Xu, Z. and Wang, H., 2007, Silicate melt properties and volcanic eruptions. *Rev. Geophys.*, **283**, 1138–1142.

*English translation from the original written in Japanese

阪上雅之・佐々木 寿・三宅康幸・向山 栄, 2011, IKONOS 高分解能衛星画像と現地踏査を併用したブルカノ式噴火噴出物の解析: 浅間火山 2004 年 9 月 1 日噴火を例に. 地質雑, **117**, 671–685. (Sakagami, M., Sasaki, H., Miyake, Y. and Mukoyama, S., 2011, The analyses of the vulcanian eruption products based on combination of the IKONOS high-resolution satellite imagery and the field survey: An example of the eruption of the Asama volcano on September 1st in 2004. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **117**, 671–685.)

浅間火山 2004 年 9 月 1 日噴火(以下, 9/1 噴火と略す)について未解明であった火口西側地域を中心に現地踏査を行った. さらに, 高分解能衛星画像の判読結果や室内分析および火山監視画像の解析から 9/1 噴火による本質物(パン皮状火山弾)を特定し, それらの分布を明らかにした. 地層を形成しにくいブルカノ式噴火噴出物の分布を現地で把握するために, 高分解能衛星画像が有効であった. 現地踏査単独ではブルカノ式噴火噴出物の把握は難しいため, 平常時より高分解能衛星画像や空中写真の整備など, 噴火前後の微地形変化を比較できる準備が必要である. 特定した本質物(パン皮状火山弾)を用いて, 9/1 噴火をもたらしたマグマの実態を推定した. 含水量測定の結果より算出されたマグマ深度の差から, マグマ柱は鉛直方向に少なくとも 180 m 程度の高さであったと考えられる.